

ГЛАВА 2

Автоматическое повторное включение

2.1. Общие положения

Опыт эксплуатации электрических сетей показывает, что в большинстве случаев короткие замыкания, вызванные нарушением изоляционных свойств воздушных промежутков, успешно самоликвидируются после снятия напряжения. Это объясняется способностью воздуха восстанавливать свои изоляционные свойства после погашения электрической дуги в месте пробоя. Следовательно, можно восстановить нормальную работу сети, выполнив следующие операции:

отключить поврежденную линию от источника питания и оставить ее на некоторое время без напряжения;

после паузы, в течение которой происходит ликвидация короткого замыкания, подать напряжение на отключенную линию.

Отключение поврежденной линии, трансформатора, шин и т.д. осуществляется релейной защитой. Их повторное включение может быть выполнено как вручную, так и средствами автоматики. Комплекс автоматики, обеспечивающий повторное включение линии (трансформатора, шин и т.д.) называется устройством автоматического повторного включения или сокращенно АПВ. Далее АПВ рассматривается для линии электропередачи.

Если после повторного включения линия остается в работе, то говорят, что цикл АПВ был успешным, если отключается вновь, то цикл АПВ был неуспешным.

Опыт эксплуатации АПВ на линиях показывает, что приблизительно в 65 – 70 % случаев действие АПВ является успешным. Это означает, что в большинстве аварийных случаев действием АПВ линии сохраняются в работе.

Устройства АПВ выполняются однократными и многократными. В многократных АПВ цикл повторного включения осуществляется несколько раз. Из многократных АПВ обычно используются двукратные и трехкратные циклы АПВ.

Эффективность последующих циклов АПВ ниже, чем эффективность первого цикла (однократного АПВ). Так, статистические данные показывают, что успешность восстановления линии в работе за счет второго цикла составляет около 15%, а третьего – всего 1,5 – 3,0%. Более подробные данные о работе устройства АПВ приведены в таблице 2.1 [2, 3].

Таблица 2.1

Статистические данные об успешности работы АПВ (в процентах)

Тип устройства	Напряжение линии, кВ				
	2–10	20–35	110–154	220–330	400–500
ТАПВ однократное	53,5	69,5	75,0	76,5	67,0
ТАПВ многократное	56,2	78,1	80,5	77,2	–
ОАПВ	–	–	73,2	80,7	59,5
Все виды	53,6	70,5	75,5	77,0	64,5

В энергосистемах России наибольшее распространение получило АПВ однократного действия.

За счет многократного действия успешность АПВ повышается. Однако необходимо иметь в виду, что осуществление многократного АПВ усложняет схему автоматики и утяжеляет режим работы выключателей. Даже при однократном цикле АПВ выключатель работает в более тяжелых условиях, чем в режиме обычного отключения. Это определяется тем, что под действием электрической дуги, возникающей между контактами выключателя в режиме отключения, масло в гасительной камере в какой-то степени теряет свои изоляционные свойства. Ухудшение свойств масла сказывается на отключающей способности выключателя в цикле неуспешного однократного АПВ. В случае многократного АПВ ухудшение свойств масла проявляется в большей степени.

В воздушных выключателях готовность к повторному включению определяется давлением воздуха в резервуаре. При установке устройства АПВ однократного или многократного действия должны быть предусмотрены запасы сжатого воздуха для обеспечения действия выключателя в нескольких циклах.

В цикле АПВ линия некоторое время находится без напряжения. С точки зрения потребителей, а также устойчивости параллельной работы энергосистемы, время отключенного состояния линии желательно иметь наименьшим. Для этого повторное включение должно осуществляться как можно быстрее. В то же время длительность отключенного состояния линии должна быть достаточной для деионизации среды в месте повреждения. Опытным путем установлено, что минимальное время деионизации электрической дуги при снятом напряжении с линии составляет: для ЛЭП–110 кВ 0,15–0,2 с, для ЛЭП–500 кВ 0,35 – 0,4 с. Поэтому повторное включение линии под напряжение должно производиться не ранее указанного времени [1,4].

Время включения масляных выключателей составляет 0,5 – 1,2 с. Таким образом, собственного времени включения масляного выключателя вполне достаточно для деионизации среды в месте повреждения линии. Время включения быстродействующих воздушных выключателей меньше времени деионизации, и это необходимо учитывать при настройке устройств АПВ.

Обычно подачу импульса на включение выключателя при однократном АПВ осуществляют с задержкой в 0,3 – 2,0 с. Отсчет времени задержки начинается с момента отключения выключателя. Время задержки при двукратном АПВ может составлять 10 – 15 с. В течение этой паузы линия находится без напряжения. В случае трехкратного АПВ время третьей паузы доходит до 60 – 120 с.

Учитывая высокую эффективность автоматического повторного включения, Правилами устройств электроустановок предусматривается обязательная установка АПВ на линиях всех напряжений [1, 2].

2.2. Основные варианты устройств АПВ

В зависимости от конкретных условий используются различные варианты устройств АПВ. Чаще всего на ЛЭП происходят однофазные короткие замыкания. Двухфазные короткие замыкания, а тем более трехфазные встречаются реже. В случае однофазного короткого замыкания имеет смысл от-

ключать, а затем повторно включать только поврежденную фазу. Автоматические устройства, которые выполняют такой селективный цикл, называются устройствами однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ). Из-за необходимости выбора поврежденной фазы схема ОАПВ усложняется. К тому же для реализации ОАПВ необходимо иметь выключатели с отдельным приводом фаз. Многие выключатели такого привода не имеют. Поэтому значительно чаще применяется трехфазное автоматическое повторное включение (ТАПВ), при котором независимо от числа поврежденных фаз отключаются, а затем повторно включаются все три фазы одновременно. Как правило, в случае трехфазного автоматического повторного включения не подчеркивается сам факт трехфазности. Если речь идет одновременно о трехфазном и однофазном автоматическом повторном включении, то эти различия должны быть указаны особо.

Существенное влияние на устройство АПВ оказывает схема питания линии. С этих позиций различают линии с односторонним и двусторонним питанием. На линиях с двусторонним питанием дополнительные осложнения возникают из-за необходимости соблюдения синхронности работы источников питания по концам линии. Для этого применяют устройства АПВ с ожиданием или улавливанием синхронизма (АПВОС или АПВУС).

В некоторых случаях синхронность работы возможно восстановить за счет сочетания автоматического повторного включения с самосинхронизацией генераторов. Комплекс автоматики, осуществляющий такой цикл, сокращенно обозначают АПВС.

Следует иметь в виду, что элементы автоматики по контролю или улавливанию синхронизма затягивают цикл повторного включения. Поэтому применять эти типы АПВ следует в случаях действительной необходимости.

При использовании быстродействующих выключателей весь цикл отключения поврежденной линии с последующим повторным включением может быть осуществлен весьма быстро. Такое АПВ называется быстродействующим автоматическим повторным включением (БАПВ). За короткий промежуток времени нарушения связи между источниками питания последние, как правило, не выходят из синхронизма, в связи с чем в схемах БАПВ не требуется иметь дополнительные элементы по контролю или улавливанию синхронизма.

Если сопротивление линии связи между источниками питания велико, то при повторном включении допустимо несинхронное включение. Расчетным путем определяются условия, при которых части энергосистемы входят в синхронизм. Такое включение осуществляется с помощью несинхронного АПВ (НАПВ).

Наиболее простыми являются схемы АПВ однократного действия для линий с односторонним питанием. В зависимости от принципа пуска различают схемы АПВ с пуском от релейной защиты и с пуском от несоответствия положения ключа управления и выключателя. Особую разновидность составляют устройства АПВ для выключателей с пружинным или грузовым приводом. Для этих выключателей применяются так называемые механические устройства АПВ.

2.3. Схема АПВ с пуском от релейной защиты

Устройство АПВ должно обеспечивать установленную кратность автоматического повторного включения. В случае однократного АПВ допускается единственное повторное включение. Если такое включение не приводит к восстановлению нормальной работы, то линия должна отключаться. Последующих включений не должно быть. При ручном отключении линии автоматическое повторное включение не допускается.

В схемах АПВ с пуском от релейной защиты программа однократного действия автоматики осуществляется с помощью реле времени КТ2 с проскальзывающим контактом (рис. 2.1).

Схема работает следующим образом. При повреждении на линии срабатывает релейная защита, которая подает сигнал на отключение выключателя. Последовательно с катушкой отключения УАТ включено промежуточное реле КТ1 так, что при подаче сигнала на отключение это реле срабатывает и запускает схему повторного включения – реле КЛ1, КТ2 и КЛ2. Как было сказано, реле времени КТ2 является программным устройством схемы, обеспечивающим однократность действия АПВ. Реле КТ2 имеет три пары контактов. Контакты 1 служат для самоудерживания. Проскальзывающий кон-

такт 2, замыкающийся с выдержкой времени t_2 , создает импульс на повторное включение. Выдержка времени замыкания третьего контакта t_3 больше выдержки времени замыкания второго контакта t_2 . Реле времени возвращается в исходное положение только после замыкания контакта 3, т.е. тогда, когда вся программа цикла выполнена.

Кратко рассмотрим действие схемы при успешном и неуспешном цикле АПВ.

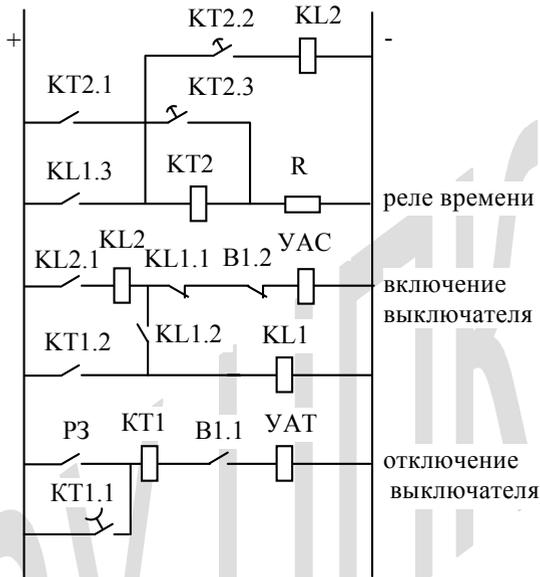


Рис.2.1. Схема АПВ с пуском от релейной защиты

Успешный цикл АПВ. При повреждении на линии срабатывает релейная защита и отключает линию. Одновременно запускаются элементы схемы АПВ. Если на отключенной линии повреждение самоликвидируется, то релейная защита, а также реле $KT1$ и $KL1$ возвращаются в исходное положение. Однако реле $KT2$ самоудерживается и обеспечивает выполнение программы повторного включения. По истечении выдержки времени t_2 , равной порядка 0,5 с, подается сигнал на реле $KL2$, которое в свою очередь подает сигнал на включение выключателя. Реле $KL2$ имеет дополнительную, последовательную обмотку, за счет которой якорь удерживается до момента

включения выключателя. По истечении выдержки времени t_3 замыкается третий контакт реле КТ2 и это реле возвращается в исходное положение.

Неуспешный цикл АПВ. Релейная защита отключает линию, а устройство АПВ подает сигнал на включение выключателя. В случае устойчивого повреждения релейная защита вторично отключает линию. Выдержка времени t_3 выбирается больше времени срабатывания релейной защиты и равняется обычно 8 – 10 секундам. Поэтому реле времени КТ2, запущенное при первом срабатывании защиты, продолжает работать. Действие проскальзывающего контакта КТ2.2 было использовано, поэтому сигнала на включение не будет. При замыкании контакта КТ2.3 схема возвращается в исходное положение.

Проскальзывающий контакт 2 реле КТ2 может застревать, что является недостатком этой схемы. При этом получается длительный импульс на включение, а следовательно, возможно многократное включение выключателя. Для устранения этого явления цепь включения дополнительно заводится через нормально закрытый контакт реле КЛ1. При очередном отключении реле КЛ1 срабатывает и «затянувшийся» сигнал на включение через контакт КЛ1.2 переведет на себя. В таком случае контакты КЛ1.1 будут удерживаться в разомкнутом состоянии и сигнал на включение не пройдет.

При отключении линии от ключа управления схема АПВ не запускается и повторного включения не будет.

2.4. Схема АПВ с пуском от несоответствия положения ключа управления и выключателя

Пуск схемы АПВ производится от несоответствия положения ключа управления и выключателя. Так, если ключ управления SA находится в положении «включено», а выключатель по какой-либо причине отключился, то устройство АПВ будет запущено и подаст сигнал на повторное включение.

Напомним алгоритм действия автоматики повторного включения. При коротком замыкании на линии срабатывает релейная защита и отключает ее. Через некоторое время автоматика повторно включит линию. Выдержка времени необходима для того, чтобы погасла дуга в месте короткого замыкания.

Если короткое замыкание было проходящим, то после повторного включения линия сохранится в работе. На этом действие релейной защиты и АПВ заканчивается.

При устойчивом коротком замыкании на линии за время бестоковой паузы повреждение не ликвидируется. Повторная подача напряжения на линию не приведет к желаемому результату – сохранению линии в работе. Релейная защита повторно отключит линию. Поскольку АПВ однократное, то линия останется в отключенном состоянии. Схема автоматики, реализующая рассмотренный алгоритм, показана на рис. 2.2.

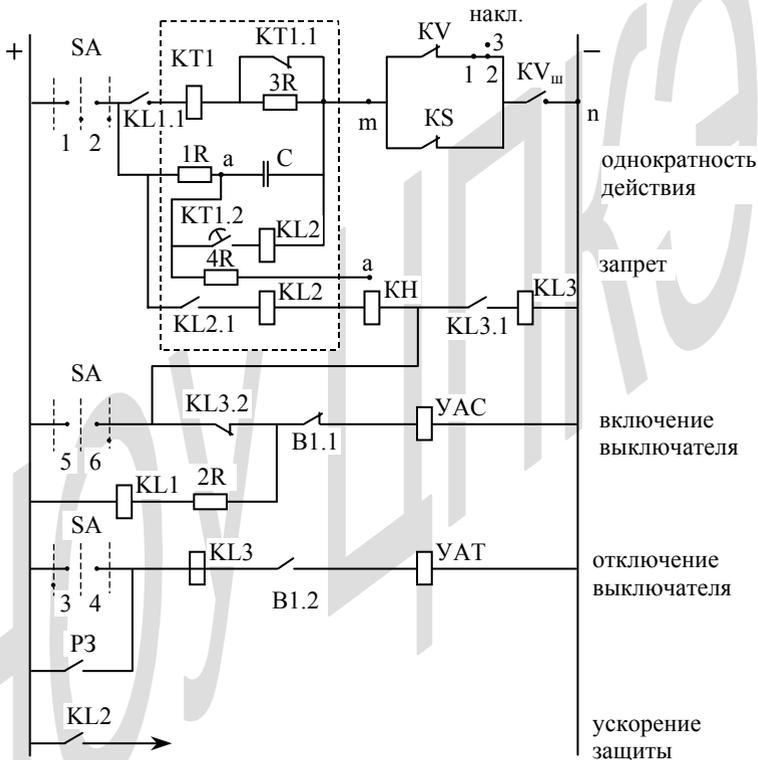


Рис.2.2. Схема АПВ с пуском от несоответствия между положениями выключателя и ключа управления

Прежде всего, обратим внимание на ручное управление линией, которое осуществляется ключом SA. Рукоятка этого ключа может занимать три положения – нейтральное, левое и правое. Поворот ключа влево соответствует команде «отключено». В правом положении подается команда на включение.

При возвращении ключа SA в нейтральное положение поданная команда может исчезнуть или сохраниться. Сохранение (запоминание) команды на схеме ключа SA отмечено точкой на средней пунктирной линии. Контакты 1–2 замыкаются при повороте ручки ключа вправо и после возврата ручки в нейтральное положение остаются замкнутыми.

Рассмотрим действие схемы по рис. 2.2. При включенном положении SA его контакты 1–2 замкнуты и конденсатор С заряжается через сопротивление 1R. Если выключатель отключился, то его вспомогательные контакты В1.1 замыкают цепь реле KL1. Это реле является пусковым реле схемы АПВ. При пуске устройства АПВ срабатывает реле КТ1, которое с выдержкой времени подключает конденсатор С к параллельной обмотке реле KL2. Срабатывание этого реле обеспечивает подачу сигнала на включение выключателя. В случае успешного АПВ линия сохраняется в работе.

Однократность повторного включения обеспечивается за счет цепочки 1R–С. При включении на обмотку реле KL2 конденсатор С разряжается. Время заряда конденсатора через сопротивление 1R выбирается в пределах 15 – 20 с. При неуспешном АПВ действием релейной защиты линия вновь отключается. Однако, поскольку конденсатор к этому времени не успевает зарядиться, то очередного повторного включения не произойдет. В отключенном состоянии выключателя конденсатор не может зарядиться, так как он шунтирован обмоткой реле KL2.

В случае ручного отключения выключателя повторное включение не произойдет, поскольку контакты 1 – 2 ключа управления разомкнуты и, несмотря на возможное срабатывание реле KL1, КТ1 и KL2, сигнала на включение не будет.

Следует заметить, что при очередном включении линии устройство АПВ становится готовым к действию через 15 – 20 с, т.е. после того как зарядится конденсатор. Поэтому при ручном включении выключателя на поврежденную линию повторного включения не последует.

Реле KL3 обеспечивает доминирующее действие сигнала на отключение. Так, если релейная защита подаст сигнал на отключение, то это реле сработает. Если при этом существует импульс на включение (например, приварились контакты реле KL2), то он не пройдет через разомкнутые контакты 2 реле KL3, а будет переведен на обмотку этого реле. Таким образом, несмотря на наличие импульса на включение, линия будет отключена.

Рассмотренная схема положена в основу устройств автоматического повторного включения с реле типа АПВ–1 и РПВ–58. На схеме дополнительно показаны цепочки ускорения защиты, запрета действия АПВ и некоторые другие детали устройства.

Схема АПВ с пуском от несоответствия может быть использована и на телеуправляемых подстанциях. Наличие телеуправления привносит некоторую специфику в условия работы устройства АПВ. Так, при отключении выключателя с помощью средств телемеханики, ключ управления на самой подстанции остается в положении «включено». Это обстоятельство приводит к несоответствию положения выключателя и ключа управления и служит пусковым импульсом к повторному включению. Однако повторного включения не должно быть, поскольку телеотключение соответствует ручному отключению с помощью ключа управления. Для устранения повторного включения в рассмотренной ситуации предусмотрен «запрет» действия устройства АПВ. При срабатывании реле телеуправления ТУ одновременно с сигналом на отключение подается минус в точку «а». Конденсатор разряжается, и повторное включение не происходит.

Рассмотренный способ запрета может быть использован и в любом другом случае, когда при отключении выключателя повторное включение не требуется.

2.5. Механические устройства АПВ

Для выключателей малой и средней мощности напряжением до 35 кВ используют грузовые и пружинные приводы.

Рабочее усилие пружины не остается постоянным. К концу хода включения усилие уменьшается. Для улучшения тяговой характеристики пружин-

ный привод дополняют маховиком. Вначале процесса включения избыточная энергия пружины идет на разгон маховика. К концу хода включения энергия, накопленная в маховике, передается механизму включения. Получается своего рода пружинно-грузовой привод.

Время отключения выключателя с пружинным приводом составляет 0,1 – 0,15 с, время включения 0,2 – 0,4 с.

Грузовой привод имеет встроенное механическое устройство АПВ, которое осуществляет однократное повторное включение выключателя без каких-либо дополнительных электрических элементов. Встроенное АПВ работает следующим образом. При коротком замыкании на линии действует релейная защита и подает сигнал в отключающую катушку выключателя. Происходит расцепление защелки, удерживающей выключатель во включенном положении, и выключатель отключается. С некоторой задержкой сердечник отключающей катушки воздействует и на другую защелку, удерживающую груз в верхнем положении. Освобожденный груз производит включение выключателя. Время автоматического повторного включения с механическим пуском составляет 0,3 – 0,6 с.

В случае устойчивого короткого замыкания релейная защита повторно отключает линию. Однако теперь включение выключателя не произойдет, поскольку груз находится в своем нижнем положении. Для его подъема требуется время около 10 с, к тому же в результате действия встроенного АПВ шкив привода дополнительно запирается.

Возможно дистанционное управление грузовым приводом. Для этого имеется катушка включения и дистанционная отключающая катушка. При подаче питания в дистанционную отключающую катушку выключатель отключается, однако повторное включение не происходит.

Пружинный привод может изготавливаться как со встроенным механическим АПВ, так и без него. В последнем случае автоматическое повторное включение может быть осуществлено с помощью электрической схемы.

2.6. АПВ многократного действия

Многократные автоматические повторные включения повышают вероятность восстановления нормального режима поврежденной линии. Так, за счет двукратного включения удастся восстановить нормальный режим работы

в 15 % случаев, а за счет трехкратного – 1,5 – 3,0% случаев действия устройства АПВ в соответствующем цикле.

Однако многократные циклы АПВ утяжеляют условия работы выключателей, что требует их более частой ревизии. К тому же схемы многократных АПВ сложнее и менее надежны. Эти соображения должны приниматься во внимание при выборе кратности циклов устройств АПВ. В энергосистемах России из многократных АПВ наибольшее применение имеют двукратные АПВ.

Схема двукратного АПВ с реле РПВ–258 бывшего Чебоксарского электроаппаратного завода в основном аналогична схеме рис.2.2, что вполне объяснимо, поскольку элементы управления выключателем остаются теми же самыми.

Для двукратного повторного включения предусмотрены две цепочки «памяти» 1R–1C и 2R–2C, каждая из которых обеспечивает ее однократное повторное включение с заданной выдержкой времени. Для этой цели предусмотрено реле времени с тремя выдержками. Нормально замкнутый контакт КТ1.1 размыкается и снимает шунтирование резистора в цепи реле времени. Тем самым обеспечивается термическая стойкость обмотки реле КТ1. Выдержка времени $t_2 = 0,5 - 1,0$ с (проскальзывающий контакт реле) используется для однократного повторного включения. Выдержка времени $t_3 = 10 - 15$ с обеспечивает двукратный цикл АПВ.

2.7. Ускорение действия защиты до и после АПВ

Селективное действие некоторых защит достигается за счет выдержки времени. Если на линии установлено устройство АПВ, то такая задержка в

отключении может оказаться неоправданной. С помощью АПВ может быть предпринята попытка восстановить нормальную работу поврежденной линии до истечения выдержки времени релейной защиты, выбранной по условию селективности. Для реализации этого мероприятия релейная защита должна заведомо сработать без выдержки времени неизбирательно, т.е. ее действие специально должно быть ускорено до цикла АПВ.

Возможен другой вариант согласования действия релейной защиты и устройства АПВ. Релейная защита отключает поврежденную линию избирательно с выдержкой времени. В случае успешного цикла АПВ линия сохраняется в работе. Если цикл АПВ неуспешен, то релейная защита снова отключает линию. Для повторного отключения линии нет надобности выжидать истечения выдержки времени релейной защиты. Теперь уже известно какая линия повреждена, поэтому действие релейной защиты может быть ускорено. Такое мероприятие называют ускорением действия релейной защиты после АПВ.

Рассмотрим примеры электрической сети, где целесообразно ускорение действия релейной защиты до и после АПВ.

Ускорение до АПВ. Схема сети показана на рис. 2.3.

Рассмотрим схему, на линиях которой установлены максимальные токовые защиты с выдержками времени, выбранными по ступенчатому принципу. Ступенчатый принцип обеспечивает селективность действия релейной защиты по времени. Недостатком способа является наличие больших выдержек времени, особенно у защит на участках линии, близких к источнику питания.

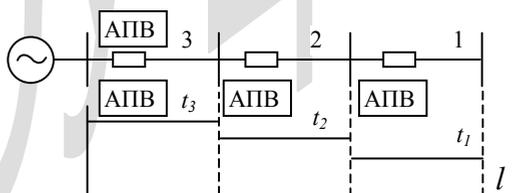


Рис.2.3. Схема сети

Устройство АПВ устанавливается только на головном участке сети. Релейная защита этого участка действует с ускорением до АПВ. Это значит,

что до цикла АПВ время срабатывания защиты третьего участка заведомо уменьшается до величины, меньшей t_1 . Несомненно, что такая перенастройка приведет к неселективному действию защиты. Однако при наличии АПВ на головном участке такое неселективное действие оправдано.

В случае короткого замыкания на любом участке сети в первую очередь срабатывает защита 3 участка и отключает магистраль целиком. Устройство АПВ производит повторное включение магистрали. При успешном цикле АПВ все линии сохраняются в работе. Если короткое замыкание устойчивое, то после АПВ опять придет в действие релейная защита. Однако теперь защита будет действовать с выдержкой времени и произведет селективное отключение только поврежденного участка.

Ускорение действия релейной защиты до АПВ имеет свои положительные и отрицательные стороны. Достоинством метода является быстрая ликвидация проходящих коротких замыканий, независимо от места их возникновения.

Следует иметь в виду, что ускоренное отключение поврежденной линии повышает вероятность успешного АПВ, так как в ряде случаев проходящее к.з. не успеет перейти в устойчивое короткое замыкание.

Отрицательной стороной ускорения действия релейной защиты до АПВ является утяжеление условий работы выключателя на головном участке сети. Этот выключатель работает наиболее часто и, следовательно, чаще обычного должен выводиться в ревизию.

Ускорение после АПВ. Пояснение целесообразности ускорения релейной защиты после АПВ проведем на том же примере сети по рис. 2.3. Будем считать, что на линиях установлены максимальные токовые защиты с выдержками времени t_1 , t_2 и t_3 , выбранными по ступенчатому принципу. Примем также, что устройства АПВ установлены на всех участках магистрали. В случае короткого замыкания релейная защита работает с выдержкой времени и селективно отключает поврежденный участок. Устройство АПВ повторно включает линию. При успешном цикле АПВ магистраль сохраняется в работе. Если короткое замыкание устойчиво, то поврежденный участок должен быть снова отключен, причем чем быстрее, тем лучше. Быстрое отключение достигается за счет ускорения действия релейной защиты после АПВ. Отсутствие выдержки времени при повторном срабатывании не приво-

дит к неселективному отключению, так как место повреждения уже определено при первом отключении.

В рассмотренном случае каждый выключатель отключает лишь повреждение на своей линии, так что условия работы выключателей одинаковы, и это является преимуществом схемы по сравнению с вариантом ускорения релейной защиты до АПВ. Однако в этом случае проходящие короткие замыкания ликвидируются медленнее и к тому же вероятность успешного АПВ ниже – пока защита задерживает первое отключение, проходящее повреждение может перейти в устойчивое.

Ускорение действия релейной защиты желательно иметь как при автоматическом, так и при ручном включении выключателя. Это мероприятие позволяет быстро отключить линию при ее включении на короткое замыкание, например, на неснятое заземление. Гарантия быстрого отключения позволяет осуществлять опробование исправного состояния линии после ее ремонта. Нужно отметить, что при опробовании оборудования АПВ выводится из действия

Для ускорения действия защиты до АПВ, кроме селективной релейной защиты (СРЗ), устанавливают неселективную ускоренную защиту (НРЗ), например, токовую отсечку. После действия АПВ токовая отсечка выводится из работы. Принципиально можно ускорить действие релейной защиты до АПВ за счет временного шунтирования реле времени защиты. Однако благодаря особым условиям выбора тока срабатывания защиты, ускоряемой до АПВ, чаще используется первый способ, т.е. специально устанавливаемые токовые реле.

Ускорение защиты после АПВ также может быть осуществлено либо за счет временного шунтирования контактов реле времени основной защиты, либо за счет установки дополнительных токовых реле, вводимых в действие на некоторое время. Токовые реле ускоренной защиты должны быть отстроены от пусковых токов двигателей, заторможенных в процессе короткого замыкания.

Ускорение действия релейной защиты должно вводиться на определенный промежуток времени. Это осуществляется с помощью специального реле КЛ, имеющего замедление на возврат. Пуск реле производится от реле КЛ2 (рис. 2.2).

2.8. АПВ линий с двусторонним питанием

На линиях с двусторонним питанием за время бестоковой паузы источники питания могут выйти из синхронизма. Поэтому перед повторным включением линии необходимо провести проверку некоторых условий, гарантирующих допустимость повторного включения. В ряде случаев такую проверку производить необязательно, ибо успешность повторного включения обеспечивается определенными факторами.

В зависимости от структуры сети и типа выключателей на ЛЭП, возможны следующие решения:

1. Линия имеет шунтирующие связи (три, четыре), за счет которых сохраняется синхронная работа источников питания в цикле АПВ. В этом случае рекомендуется применять устройства АПВ без проверки синхронизма, такие же, как и на линиях с односторонним питанием. При выборе уставки АПВ необходимо учитывать время отключения короткого замыкания с противоположного конца линии.
2. Линия не имеет шунтирующих связей. Если линия оборудована быстродействующими выключателями и быстродействующей релейной защитой, то рекомендуется применять быстродействующее автоматическое повторное включение (БАПВ). Время полного цикла БАПВ может составить 0,2–0,3 с. За это время источники питания по концам линии не успеют выйти из синхронизма, что и служит предпосылкой для включения без проверки синхронности встречных напряжений.
3. При отсутствии шунтирующих связей возможно применять несинхронное автоматическое повторное включение (НАПВ). Способ рекомендуется использовать тогда, когда величина тока при самом неблагоприятном угле включения не превосходит допустимых для генераторов, синхронных компенсаторов и трансформаторов значений.
4. Для гидростанций с небольшим числом агрегатов возможно повторное включение линии без проверки синхронности встречных напряжений. В этом случае автоматическое повторное включение сочетают с самосинхронизацией генераторов ГЭС (АПВС).
5. Если на линии недопустимо несинхронное повторное включение и невозможно применять БАПВ, то рекомендуется использовать автоматическое

повторное включение с ожиданием или улавливанием синхронизма (АПВУС).

2.9. Несинхронное АПВ

Работа релейной защиты и автоматики несинхронного повторного включения происходит следующим образом. При коротком замыкании на линии действием релейной защиты линия отключается с обеих сторон. Устройство АПВ повторно включает линию без проверки синхронности встречных напряжений. Восстановление синхронизма происходит или немедленно или сопровождается качаниями и асинхронным ходом. Длительные качания и асинхронный ход допускаются в течение не более 2 минут. За это время должны быть приняты меры, обеспечивающие восстановление синхронизма. В противном случае необходимо произвести разделение систем вручную или автоматически.

Для несинхронного повторного включения используются устройства АПВ аналогичные тем, которые применяются на линиях с односторонним питанием. Времена действия устройств АПВ по концам линии выбираются различными. Этим обеспечивается неодновременность повторного включения линии с двух сторон. С той стороны линии, где АПВ включает раньше, вводится ускорение релейной защиты после цикла АПВ на время 0,5 – 1,0 с.

В случае одновременного включения выключателей на обоих концах линии и при наличии устойчивого повреждения, режим несинхронного включения наложится на режим короткого замыкания. В таких условиях возможны отказы и неправильные действия защиты на защищаемой линии и на смежных участках. Разновременность действия устройств АПВ с ускорением защиты исключает такую возможность. Однако и в этом случае приходится принимать специальные меры для предотвращения неправильного действия релейной защиты.

Несинхронное включение допустимо, если электромагнитные моменты, возникающие на валу агрегата при включении, не превышают моментов, которые возникают при внезапном коротком замыкании на выводах машины.

Максимальные электромагнитные моменты возникают на валу гидрогенераторов при включении с углом $\delta = 120^\circ - 135^\circ$, а у турбогенераторов – с уг-

лом $110^\circ - 120^\circ$. Расчет моментов при АПВ затруднителен, поэтому на практике в качестве приближенного критерия допустимости несинхронного включения используют значения токов. Для турбогенераторов и гидрогенераторов с успокоительными обмотками несинхронное АПВ допустимо, если соблюдается условие

$$\frac{I_{напв}}{I_{ном}} \leq \frac{0,625}{x_d''}. \quad (2.1)$$

Для гидрогенераторов без успокоительных обмоток

$$\frac{I_{напв}}{I_{ном}} \leq 3. \quad (2.2)$$

Синхронные компенсаторы можно включать несинхронно, если

$$\frac{I_{напв}}{I_{ном}} \leq \frac{0,84}{x_d''}. \quad (2.3)$$

В формулах $I_{напв}$ – максимальное значение периодической составляющей тока в статоре генератора, рассчитанное при включении с углом $\delta=180^\circ$.

Если известно, что при несинхронном включении частота и напряжение сети не отличаются от номинального значения более, чем на $\pm 5\%$, то найденные по формулам значения допустимых уравнильных токов можно увеличить на 13 % для турбогенераторов и на 35 % для гидрогенераторов с успокоительными обмотками.

Для трансформаторов НАПВ допустимо, если уравнильный ток, найденный для несинхронного включения с углом $\delta=180^\circ$, не превышает тока короткого замыкания, допустимого для данного трансформатора, т.е.

$$\frac{I_{напв}}{I_{ном}} \leq \frac{1}{x_m}. \quad (2.4)$$

Несинхронное включение кратковременно сопровождается появлением токов и напряжений нулевой и обратной последовательностей, снижением напряжения и протеканием больших уравнивающих токов. Большинство защит, за исключением защит, основанных на дифференциальном принципе (ДФЗ, РДЛ), могут не отличить несинхронное включение от короткого замыкания и сработать неселективно.

Известны различные способы, предотвращающие ложное срабатывание защиты при несинхронном включении:

понижение чувствительности релейной защиты до такой величины, при которой релейная защита не реагирует на несинхронное включение;

увеличение времени действия защиты на величину, достаточную для отстройки от влияния симметричных составляющих обратной и нулевой последовательности, обусловленных неодновременностью замыкания фаз выключателей;

кратковременный вывод защиты из действия перед несинхронным повторным включением.

2.10. Быстродействующее АПВ

Назначение БАПВ состоит в том, чтобы произвести повторное включение как можно быстрее. За незначительное время нарушения электрической связи генераторы по концам линии не успевают разойтись на большой угол и вхождение в синхронизм будет сопровождаться относительно небольшим толчком уравнивающего тока. Схема автоматики устройства БАПВ получается простой, ибо не требуются элементы по проверке условий синхронности встречных напряжений. Применение быстродействующего АПВ стало возможным с появлением быстродействующих выключателей и быстродействующих защит.

Допустимость БАПВ определяется следующими условиями:

в момент включения угол между встречными напряжениями не должен превосходить допустимого значения, определяемого динамической устойчивостью системы, т.е. $\delta_{вкл} \leq \delta_{доп}$;

время бестоковой паузы должно быть больше времени деионизации электрической дуги в месте повреждения;

максимальные электромагнитные моменты, возникающие на валу генераторов при включении, не должны превосходить значений моментов при коротком замыкании на выводах машины.

Время бестоковой паузы ориентировочно можно оценить следующим образом. Рассмотрим пример, когда станция работает через одиночную ЛЭП в энергосистему с начальным значением угла $\delta_0 = 20^\circ$. По условию сохранения динамической устойчивости предельное значение угла принимается равным $\delta_{np} = 70^\circ$. Предполагая движение ротора машины в начале возникновения аварии и до повторного включения равномерно ускоренным, для приращения угла в радианах, будем иметь

$$\Delta\delta_{рад} = \delta_{np} - \delta_0 = \frac{1}{2} \Delta P_* \frac{\omega_{ном}}{T_j} t^2, \quad (2.5)$$

где T_j – инерционная постоянная времени агрегатов станции, с;

ΔP_* – мощность станции, выдаваемая в энергосистему, о.е.

Для расчета приращения угла в электрических градусах формула преобразуется к виду

$$\Delta\delta = 9000 \frac{\Delta P_*}{T_j} t^2. \quad (2.6)$$

Если положить, что до короткого замыкания станция половину мощности выдавала в энергосистему ($\Delta P_* = 0,5$), а также $T_j = 10$ с и $\delta_{np} = 70^\circ$, то получим, что предельное значение угла будет достигнуто через время 0,33 с. Время действия быстродействующей защиты 0,04 с. Время гашения дуги в выключателе составляет 0,06 с. Следовательно, напряжение с линии будет снято через 0,1 с. Отсюда видно, что для деионизации электрической дуги на поврежденной линии остается время 0,23 с. На линиях 110 кВ этого времени достаточно для полной деионизации дуги. Если бы до аварии станция вы-

давала полную мощность в систему, то $P_* = 1,0$ и предельное значение угла достигалось бы за меньшее время. Условия БАПВ были бы более тяжелыми.

Увеличение времени бестоковой паузы повышает вероятность завершения деионизации в месте пробоя, однако это приводит к увеличению угла включения $\delta_{вкл}$ и возможному нарушению устойчивости. Для деионизации электрической дуги на линиях 220 – 500 кВ требуется время 0,3 – 0,4 с. В соответствии с приведенными выше данными, за это время угол δ может превысить допустимое значение. И, тем не менее, на линиях 220 – 500 кВ БАПВ применяется. Это обусловлено следующими обстоятельствами. Во-первых, многие ЛЭП имеют шунтирующие линии, по которым поддерживается связь между частями энергосистемы и расхождение по углу в аварийной ситуации происходит медленнее. Во-вторых, мощность, передаваемая по ЛЭП, как правило, составляет небольшую долю от мощности энергосистемы. В таком случае отключение линии приводит к относительно небольшому возмущению ($\Delta P_* \ll 1,0$), что в свою очередь уменьшает скорость изменения угла δ .

Быстродействующее автоматическое повторное включение обеспечивает включение линии с меньшими по сравнению с НАПВ углами включения. Поэтому условия работы релейной защиты в цикле БАПВ также легче. Быстродействующие защиты нулевой и обратной последовательностей должны быть отстроены по времени от возможного срабатывания за счет появления этих составляющих при неодновременном замыкании фаз выключателя. Чтобы защиты от междуфазных коротких замыканий (кроме дифференциальных) не срабатывали от уравнильных токов, они должны быть загрублены или замедлены на время действия БАПВ.

К релейной защите предъявляется требование одновременности отключения линии с обеих сторон. Высокочастотные защиты, которыми оборудованы линии напряжением 110 кВ и выше, как правило, удовлетворяют этому требованию.

В основу устройства быстродействующего автоматического повторного включения положено комплектное реле РПВ–58. Для того чтобы реле подавало сигнал на включение без задержки, контакты реле времени КТ1.2 (рис. 2.2) шунтируют.

Успешная работа воздушного выключателя зависит от давления воздуха в резервуаре. Для воздушных выключателей напряжением 110 кВ и выше номинальное давление равно 2,0 МПа. Минимальное давление, обеспечивающее отключение короткого замыкания, равно 1,6 МПа. При одном отключении выключателя давление снижается на 0,3 МПа. В случае неуспешного АПВ выключатель должен обладать потенциальными возможностями для повторного отключения, для это в резервуаре после АПВ должно быть не ниже 1,6 МПа, а следовательно, до АПВ не ниже 1,9 МПа. В схеме АПВ предусматривается блокировка по давлению воздуха: действие автоматики разрешается только в том случае, если давление воздуха не менее 1,9 МПа. При ручном управлении можно отключать выключатель вплоть до давления 1,6 МПа. В случае снижения давления ниже 1,6 МПа все операции запрещаются.

2.11. АПВ с ожиданием синхронизма

Если на линии с двусторонним питанием нельзя применить БАПВ, а несинхронное включение приводит к недопустимым уравнительным токам, АПВ линии должны быть оборудованы специальными устройствами, которые разрешают производить повторное включение только в том случае, когда встречные напряжения синхронны.

При возникновении аварии линия отключается с двух сторон и остается без напряжения. Перед повторным включением с той стороны, где включение производится в первую очередь, проверять синхронность напряжений не требуется, так как на линии напряжения нет. Проверка синхронности должна осуществляться только на другом конце, на котором повторное включение линии производится под нагрузку. Таким образом, такой способ повторного включения предполагает строгую очередность включения выключателей по концам линии. Для получения очередности включения АПВ линии дополнительно оборудуются с одной стороны устройством контроля отсутствия напряжения (KV), с другой – устройством контроля синхронности напряжения (KS).

На рис. 2.4 показана схема подключения АПВ с устройствами KV и KS.

Цепь включения выключателя от устройства АПВ дополнительно замыкается через контакты этих реле. Если напряжение на линии отсутствует, то реле держит контакты замкнутыми и сигнал от АПВ идет на включение выключателя В1. Этот выключатель включится и, если за время бестоковой паузы повреждение самоликвидировалось, линия останется под напряжением. С противоположной стороны включение произойдет только тогда, когда напряжение линии и второго источника будут синхронны. В этом случае контакты KS будут замкнуты и сигнал от устройства АПВ пройдет на включение выключателя В2.

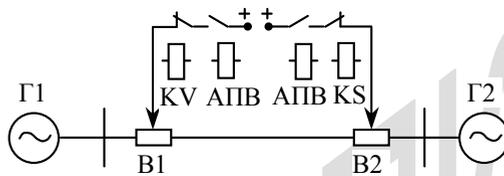


Рис.2.4. Схема АПВ линии с двусторонним питанием

На том конце линии, где проверяется отсутствие напряжения, выключатель находится в более тяжелых условиях. Действительно, в случае устойчивых коротких замыканий, после того как линия отключена, этот выключатель снова произведет включение, а затем и отключение поврежденной линии. Выключатель с противоположной стороны такого цикла не осуществляет.

Для выравнивания условий работы выключателей, устройства контроля напряжения KV и контроля синхронизма KS устанавливаются на обоих концах линии и включаются поочередно.

В основу АПВ линии с двусторонним питанием положена схема АПВ тупиковой линии. Дополнительная блокировка контроля напряжения и синхронности встречных напряжений осуществляется с помощью реле KV и KS. Для этого достаточно включить между точками «m» и «n» контакты этих реле, как это показано на рис. 2.2. При разомкнутом состоянии этих контактов цепь реле времени разомкнута, и схема АПВ работать не может.

На том конце линии, где необходимо контролировать отсутствие напряжения на ЛЭП, включают накладку (положение 1 – 2). При отсутствии напряжения реле KV замыкает контакт и разрешает действие АПВ. На про-

тивоположном конце ЛЭП накладка отключена (положение 1 – 3). Разрешающий сигнал проходит тогда, когда замкнуты контакты реле KS.

В цепи контактов KS накладка не ставится. Сделано это по следующим соображениям. Возможно отключение ЛЭП только с одной стороны, как правило, со стороны наиболее мощного источника. При таком одностороннем отключении повреждение на ЛЭП может ликвидироваться. В этом случае на ЛЭП восстановится напряжение и оно может быть синхронно с напряжением шин на отключенной стороне. Разрешение на включение в такой ситуации пройдет через контакты реле KS, коль скоро это реле не выводится из действия ни на одном конце линии.

Для контроля синхронизма используется электромагнитное реле с двумя обмотками. К реле подводится разность напряжений

$$u_p = u_u - u_l . \quad (2.7)$$

Поскольку

$$u_u = U_u \sin \omega_u t , \quad u_l = U_l \sin \omega_l t \quad (2.8)$$

и полагая $U_u = U_l = U$, имеем

$$u_p = U(\sin \omega_u t - \sin \omega_l t) = 2U \sin \frac{\omega_u - \omega_l}{2} t \cos \frac{\omega_u + \omega_l}{2} t . \quad (2.9)$$

Якорь реле реагирует только на амплитуду этого напряжения, поэтому для дальнейшего рассмотрения можно написать

$$u_p = 2U \sin \frac{\omega_s}{2} t = 2U \sin \frac{\delta}{2} , \quad (2.10)$$

где $\omega_u - \omega_l = \omega_s$ частота скольжения,

δ – угол расхождения между векторами U_u и U_l .

График напряжения $u_p = 2U \sin \frac{\delta}{2}$ показан на рис. 2.5.

Для контроля синхронизма используется реле с нормально замкнутыми контактами. При срабатывании реле его контакты размыкаются. Напряжение срабатывания и возврата указаны по оси ординат рис. 2.5. Зная эти

напряжения, можно определить углы возврата δ_e и срабатывания δ_{cp} , при которых реле замыкает и размыкает свои контакты. По оси абсцисс откладывается угол δ и время t . Отметим время возврата реле через t_1 . В этот момент контакты реле KS замкнутся и дадут разрешение к действию АПВ. С этого же момента идет отсчет времени АПВ ($t_{АПВ}$).

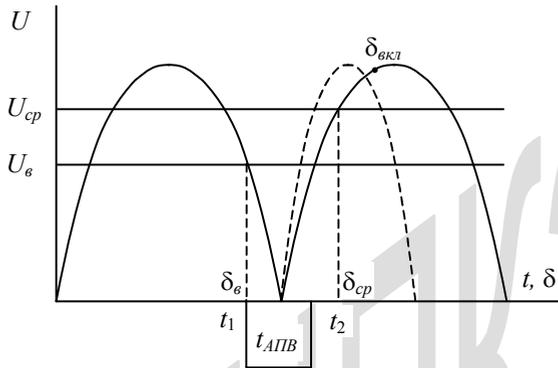


Рис.2.5. График напряжения реле KS

В момент времени t_2 срабатывает реле KS и его контакты размыкаются. Если время $t_{АПВ}$ меньше времени $t_2 - t_1$, то АПВ сработает. При $t_{АПВ} > t_2 - t_1$ АПВ не успеет сработать, так как контакты реле KS разомкнутся, вследствие чего реле времени АПВ вернется в исходное положение.

Таким образом, схема обеспечивает, во-первых, включение при небольших углах δ (разрешающий сигнал находится между углом возврата δ_e и углом срабатывания δ_{cp} , что близко к нулевому значению угла), во-вторых, контролирует скольжение и дает разрешающий сигнал только при малых скольжениях. В самом деле, если скольжение велико (пунктирная кривая u_p), то реле KS разомкнет свой контакт раньше, чем завершится выдержка времени $t_{АПВ}$.

Сигнал от АПВ на включение выключателя подается после завершения выдержки времени $t_{АПВ}$. Включение же линии произойдет с задержкой, обусловленной временем срабатывания выключателя. Если сигнал от АПВ

подается при угле срабатывания $\delta_{ср}$ или чуть раньше, то включение произойдет при угле включения $\delta_{вкл}$. Для успешного втягивания в синхронизм угол включения $\delta_{вкл}$ выбирается не более 70° . Исходя из этого значения угла, можно найти угол срабатывания $\delta_{ср}$. Для этого надо знать время включения выключателя и допустимое скольжение в цикле АПВ. Обычно угол срабатывания $\delta_{ср}$ составляет 40° .

Скольжение, при котором разрешается включение, можно подсчитать по формуле

$$f_s = \frac{\delta_{ср} + \delta_{с}}{t_{АПВ} \cdot 360^\circ}. \quad (2.11)$$

Так, если $\delta_{ср} = 40^\circ$, а $\delta_{с} = k_{с} \delta_{ср}$, где $k_{с} = 0,85$, то при $t_{АПВ} = 1,0$ с. будем иметь $f_s \cong 0,2$ Гц. Обычно скольжение допускается в пределах $0,2 - 0,4$ %. В цикле АПВ при больших скольжениях генераторы по концам линии не войдут в синхронизм.

Указанная величина скольжения получается при небольшой разности частот параллельно работающих энергосистем. При наличии всего одной связи между энергосистемами и при ее отключении, разность частот энергосистем в аварийной ситуации может быть больше указанной величины. За счет действия регуляторов частоты энергосистем будут выравниваться, приближаясь к номинальному значению 50 Гц. Этот процесс может затянуться и, следовательно, затянется повторное включение линии.

Отклонение частоты и длительность переходного процесса зависят от многих величин, в первую очередь, от величины возмущения, параметров энергосистемы и настройки регуляторов частоты (см. главу 5), в связи с чем подгонка частот может занять время от нескольких секунд до нескольких минут.

Быстрее работает АПВОС при наличии шунтирующей связи. Если за счет последней энергосистемы удерживаются в синхронизме, хотя и наблюдаются качания, то реле контроля синхронизма разрешает повторно включить линию при условии, что угол между напряжениями энергосистем не выйдет за допустимые пределы.

Отметим еще одну блокировку в схеме АПВОС. Если выбрать угол срабатывания $\delta_{ср} > 60^\circ$, то реле KS будет размыкать контакты только при напряжении на реле $U_{реле} > 2U \sin \frac{60^\circ}{2} = U$. При меньших напряжениях контакты замкнуты и реле дает разрешение на включение. Если при такой настройке перегорит предохранитель трансформатора напряжения со стороны сборных шин, то на реле будет подано напряжение $U_{реле} = U$ и оно всегда будет держать контакты замкнутыми. Это приведет к неправильному включению линии при отсутствии синхронизма. Для устранения такого срабатывания предусмотрено блокирующее реле KV_ш (см. рис. 2.2), которое контролирует наличие напряжения на сборных шинах.

Повторное включение в цикле АПВОС происходит с малыми скольжениями и при угле включения $\delta_{вкл} \leq 70^\circ$. Втягивание в синхронизм происходит успешно и не сопровождается асинхронным ходом. Вследствие этого, как правило, не применяются дополнительные меры для предотвращения ложного срабатывания релейной защиты. Отмеченные обстоятельства являются достоинством АПВОС.

Повторное включение с ожиданием синхронизма применяется на линиях с двусторонним питанием либо одиночных, либо с шунтирующими связями, когда более простые схемы НАПВ или БАПВ не могут быть использованы.

Допустимые скольжения в цикле АПВ выбираются с учетом требования успешного втягивания в синхронизм повторно включаемых энергосистем. В цикле АПВОС допустимое скольжение занижено вследствие того, что непосредственно повторное включение линии (замыкание контактов выключателя) происходит не в наиболее благоприятный момент времени, когда угол включения $\delta_{вкл} \cong 70^\circ$. Наилучшим моментом замыкания контактов выключателя является момент, когда угол включения $\delta_{вкл} = 0$. Если схема АПВ обеспечит такое включение, то успешное втягивание в синхронизм может происходить при более высоких скольжениях, вплоть до 3 – 4 %.

Для реализации идеи включения при угле включения $\delta_{вкл} = 0$ схему АПВ необходимо готовить с определенным опережением по времени, чтобы замыкание контактов выключателя происходило при угле включения $\delta_{вкл} = 0$

(рис. 2.5). Повторное включение, в котором реализуется это условие, называется АПВУС – повторное включение с улавливанием синхронизма. Подробнее реализация условия включения при угле включения $\delta_{вкл} = 0$ будет рассмотрена в разделе синхронизации генераторов.

2.12. АПВ с самосинхронизацией генераторов

Сущность рассматриваемого метода повторного включения (АПВС) заключается в следующем. В случае аварии на линии с двусторонним питанием она отключается. Повторное включение осуществляется поочередно. Сначала линия включается с одной стороны. Для реализации очередности в комплекте АПВ на этом конце ЛЭП имеется реле напряжения, которое дает разрешение на повторное включение при отсутствии напряжения на линии. За время раздельной работы генераторы на противоположном конце линии развозбуждаются. Их повторное включение осуществляется методом самосинхронизации.

Подробнее метод самосинхронизации генераторов рассматривается в третьей главе. Здесь напомним лишь, что по этому методу не требуется точная подгонка частоты вращения синхронизируемого генератора и, поскольку синхронизируемый генератор не возбужден, то не требуется выбирать соответствующий момент включения по углу.

С этих позиций реализация повторного включения весьма проста и, казалось бы, метод заслуживает самого широкого применения. Однако область его использования ограничена по схемным соображениям. Практически метод может быть использован для гидростанций, работающих через ЛЭП в энергосистему.

Рассмотрим принцип действия АПВС на стороне ГЭС, в которой все агрегаты выдают мощность по линии в энергосистему (рис. 2.6).

Действие автоматики происходит следующим образом. После отключения выключателя В1 подается сигнал на автомат гашения поля (АГП) генераторов, действием которых генераторы развозбуждаются. За счет сброса нагрузки агрегаты ускоряются, и их частота вращения растет. Приходят в действие регуляторы частоты вращения, которые с течением времени уменьшат скорость вращения агрегатов до величины, близкой к синхронной. При

скольжении в 2 – 5 % схема самосинхронизации (СС) подает разрешающий сигнал на включение выключателя В1. Включение последнего произойдет в том случае, если есть напряжение на линии (контролируется с помощью реле KV3), а на сборных шинах ГЭС напряжения нет (контроль с помощью реле KV2). После включения выключателя В1 схема самосинхронизации подает возбуждение на генераторы. К синхронной частоте вращения генераторы подтягиваются за счет асинхронного момента. Втягивание в синхронизм обеспечивается за счет синхронного момента генератора.

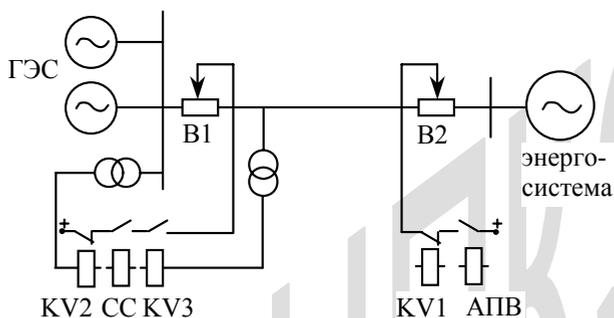


Рис.2.6. Схема АПВ в сочетании с самосинхронизацией гидрогенераторов

В случае устойчивого короткого замыкания линия еще раз будет отключена со стороны энергосистемы. Повторного включения со стороны ГЭС не произойдет, так как напряжение на линии отсутствует и реле KV3 держит свои контакты разомкнутыми.

2.13. Однофазное АПВ

На воздушных линиях электропередачи высокого напряжения наиболее часто происходят однофазные короткие замыкания. Это объясняется тем, что с повышением напряжения увеличивается расстояние между фазами линии и, как следствие этого, уменьшается вероятность повреждения между фазами. При однофазном повреждении представляется целесообразным применять цикл повторного включения только для поврежденной фазы. Такой цикл называют ОАПВ – однофазное (пофазное) автоматическое повторное включение.

ОАПВ имеет определенные преимущества. Так, при отключении одной фазы передача мощности сохраняется по двум другим фазам. Обычно в двухфазном режиме передается около 60 – 70 % номинальной мощности. За счет этого устраняется перерыв в питании потребителей, получающих энергию по одиночной линии.

Не менее важно это обстоятельство для одиночных линий с двусторонним питанием. За счет работы двумя фазами сохраняется связь между источниками питания, и последующее повторное включение поврежденной фазы проходит легче, чем в цикле трехфазного АПВ.

С другой стороны ОАПВ присущи определенные недостатки и возникают некоторые затруднения в реализации подобного цикла, а именно:

выключатели на линии должны иметь пофазный привод;

схема АПВ усложняется за счет избирателей поврежденной фазы и других блокировок;

в цикле ОАПВ появляются токи и напряжения нулевой и обратной последовательности. Защиты рассматриваемой линии и прилегающей сети должны быть загрублены или заблокированы от ложного действия в таком режиме;

двухфазный режим несимметричен и оказывает вредное влияние на работу генераторов и телефонных линий связи;

непосредственно ОАПВ не действует при междуфазных коротких замыканиях, в связи с чем возникает необходимость создания комбинированных устройств, которые при однофазных коротких замыканиях выполняют цикл ОАПВ, а при многофазных – работают как ТАПВ.

В ряде случаев после неуспешного ОАПВ предусматривается длительная работа линии по схеме две фазы–земля. Такой режим работы выдвигает повышенные требования к релейной защите смежных участков сети в отношении ее селективности. К тому же длительная несимметрия магнитного поля генераторов и двигателей приводит к их повышенному нагреву и вибрации. С учетом этих обстоятельств, возможность длительной работы линии двумя фазами проверяется для каждой линии в отдельности.

Несмотря на то, что при ОАПВ линий с двусторонним питанием связь между источниками питания сохраняется и, следовательно, нет надобности в проверке синхронности встречных напряжений, тем не менее, уместно рас-

смотреть отдельно повторное включение на тупиковых линиях и линиях с двусторонним питанием.

На линиях с односторонним питанием в качестве избирательных органов поврежденной фазы устанавливаются токовые реле (на питающем конце). На приемном конце линии применяются реле минимального напряжения, которые включаются на фазные напряжения. Если на сборных шинах нет трансформаторов напряжения, то реле избиратели подключаются к трансформаторам напряжения более низкого напряжения. Однако при этом чувствительность избирательного органа сильно снижается. В таких случаях иногда используются реле направления мощности, которые включаются на ток нулевой последовательности и линейные напряжения.

На линиях с двусторонним питанием рассмотренные избирательные органы непригодны. Здесь используют более сложные избиратели поврежденной фазы – фильтровые, комбинированные фильтровые и дистанционные. Последние получили наибольшее распространение. Дистанционные реле включаются на фазное напряжение и фазный ток, компенсированный током нулевой последовательности. Эта компенсация улучшает показатели дистанционных органов в различных режимах работы – однофазных и двухфазных коротких замыканиях, качаниях.

2.14. ОАПВ линии с односторонним питанием

Совместно с релейной защитой автоматика на ЛЭП настраивается на следующую программу:

при однофазных коротких замыканиях выбирается поврежденная фаза и отключается. Через заданный промежуток времени поврежденная фаза включается повторно. В случае успешного цикла ОАПВ линия сохраняется в работе;

ОАПВ действует однократно;

после неуспешного ОАПВ линия или переводится на работу двумя фазами, если такой режим допустим, или отключается тремя фазами;

при работе линии длительно двумя фазами в случае возникновения еще одного повреждения на линии, последняя отключается без попыток повторного включения поврежденной фазы;

при двух и трехфазных повреждениях линия отключается тремя фазами. После этого возможно применение трехфазного АПВ.

Принципиальная схема ОАПВ по рассмотренной программе показана на рис. 2.7.

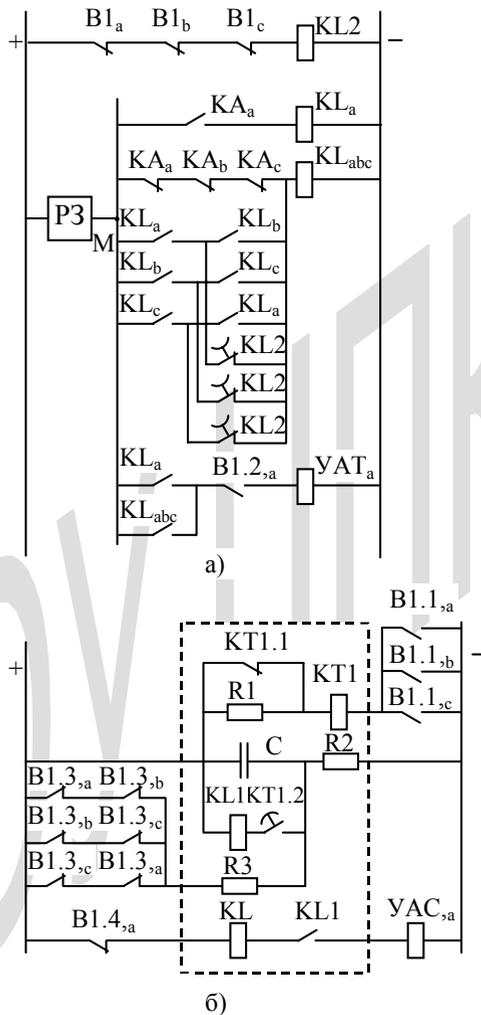


Рис.2.7. Схема ОАПВ линии с односторонним питанием

Условно схему можно разделить на две части – избиратели поврежденной фазы (рис. 2.7, а) и непосредственно схему повторного включения (рис. 2.7, б). Предположим, что на линии произошло повреждение одной фазы, которое самоликвидируется при снятии напряжения. Допустим, что произошло повреждение фазы «а» (с целью упрощения на схеме показаны цепочки, относящиеся только к фазе «а»). Для других фаз аналогичные цепочки на схеме не приводятся. При этом, те элементы других фаз, которые должны приниматься во внимание при рассмотрении фазы «а» на рисунке присутствуют.

В аварийной ситуации релейная защита срабатывает и подает плюс в точку М. Также работает избиратель поврежденной фазы – токовое реле КА_а. Своим контактом это реле подает питание на промежуточное реле КЛ_а, которое отключает поврежденную фазу. Отключение осуществляется катушкой УАТ_а, получающей питание через контакты КЛ_а. Последовательно в цепочку отключения включены блок–контакты выключателя В1.2а.

Повторное включение поврежденной фазы осуществляется схемой автоматики (рис.2.7, б). Основу этой схемы составляет комплект реле РПВ–58, а именно: реле времени КТ1, цепочка однократности действия R2–С и промежуточное реле КЛ1. Заметим, что такой комплект один на все три фазы.

Запуск схемы повторного включения производится посредством реле положения выключателя, контакты которого В1.1_а, В1.1_в и В1.1_с включены параллельно. В свою очередь эти реле пускаются от несоответствия ключа управления и положения выключателя поврежденной фазы. С выдержкой времени реле КТ1 включает промежуточное реле КЛ, которое подает питание на реле катушки включения УАС. Это реле обеспечивает включение поврежденной фазы.

В случае неуспешного ОАПВ автоматика может работать различным образом. Если допускается двухфазный режим линии, то поврежденная фаза еще раз отключается релейной защитой. Теперь повторного включения не произойдет, так как к этому моменту конденсатор С разряжен, а в отключенном состоянии линии (фазы) его подзаряд не производится. Работа будет продолжаться на двух фазах.

При недопустимости длительного двухфазного режима, после неуспешного ОАПВ линия должна быть выведена из работы. Такой вариант запрограммирован в схеме рис. 2.7 и реализуется следующим образом. Если одна из фаз отключилась, то срабатывает реле KL_2 , которое является как бы устройством памяти такого отключения. В нормальном режиме это реле находится под напряжением. Своим контактом реле KL_2 шунтирует один разрыв в контактных цепочках KL_a-KL_b , KL_b-KL_c и KL_c-KL_a , подготавливая тем самым трехфазное отключение через реле $KL_{авс}$. Если далее сработает один избиратель KA_a , то реле KL_a подаст сигнал на реле $KL_{авс}$, которое и обеспечивает отключение.

При двухфазном коротком замыкании работают два избирателя фаз, например, KA_a и KA_b . Через контакты KL_a и KL_b будет подано питание на реле $KL_{авс}$, которое отключит три фазы. Для того, чтобы при двухфазных коротких замыканиях ОАПВ не действовало, предусмотрены цепочки из блок-контактов $V1.3_a-V1.3_b$, $V1.3_b-V1.3_c$ и $V1.3_c-V1.3_a$, которые осуществляют «запрет» действия АПВ. Через эти контакты и сопротивление R_3 конденсатор C разряжается. Это происходит в том случае, когда отключаются выключатели сразу двух фаз и блок-контакты $V1$ этих выключателей замыкаются.

В схеме предусмотрена подстраховка на случай повреждения избирателя или его недостаточной чувствительности. В этой ситуации поврежденная фаза не отключается. Для защиты линии в таком случае выполнена цепочка из трех последовательно включенных контактов избирателей KA_a , KA_b , KA_c . Нормально эти контакты замкнуты. Если работает релейная защита, но ни один из избирателей не срабатывает, то подается сигнал на реле $KL_{авс}$ для трехфазного отключения линии.

На приемном конце линии устанавливается аналогичный комплект автоматики. Отличие заключается лишь в том, что на приемном конце нет релейной защиты, и сигнал к действию подается от избирателя поврежденной фазы.

Еще раз обратим внимание на наличие несимметрии при отключении одной фазы. Защиты, реагирующие на несимметрию режима, должны быть или загрублены или их время срабатывания должно быть больше времени цикла ОАПВ.

2.15. ОАПВ линии с двусторонним питанием

При однофазном отключении связь между источниками питания сохраняется по двум неповрежденным фазам. Поэтому при последующем повторном включении нет необходимости проверять синхронность встречных напряжений. С этих позиций ОАПВ линий с двусторонним питанием не отличаются от ОАПВ тупиковых линий.

Напомним, что в случае трехфазного повторного включения, наличие одного или двух источников питания приводило к существенному различию в схемах автоматического повторного включения.

В то же время между схемами ОАПВ тупиковых линий и линий с двусторонним питанием имеется существенное различие, обусловленное следующими обстоятельствами:

на линиях с двусторонним питанием применяются более сложные избиратели поврежденной фазы. Наиболее часто используются дистанционные избирательные органы;

чаще используются более сложные программы действия автоматики, такие, например, как сочетание однократного ОАПВ с последующим действием трехфазного АПВ (имеется в виду случай неуспешного ОАПВ), перевод линии после неуспешного цикла ОАПВ на двухфазный режим и т.д.

Очевидно, что как выполнение более сложных избирательных органов, так и комбинированных программ не представляет собой принципиальных трудностей при создании схем ОАПВ. Ради упрощения последующего изложения, ниже рассматривается наиболее простая схема ОАПВ, разработанная во ВНИИЭ для линий с двусторонним питанием напряжением 110 – 220 кВ, рис. 2.8.

В этой схеме реализуется следующая программа действий релейной защиты и автоматики:

при однофазном коротком замыкании выбирается поврежденная фаза, которая затем отключается. Действием ОАПВ поврежденная фаза включается повторно. В случае успешного цикла повторного включения линия сохраняется в работе;

ОАПВ действует однократно;

при неуспешном повторном включении линия отключается тремя фазами;

если на линии происходит междуфазное короткое замыкание, то отключаются три фазы и повторное включение не производится.

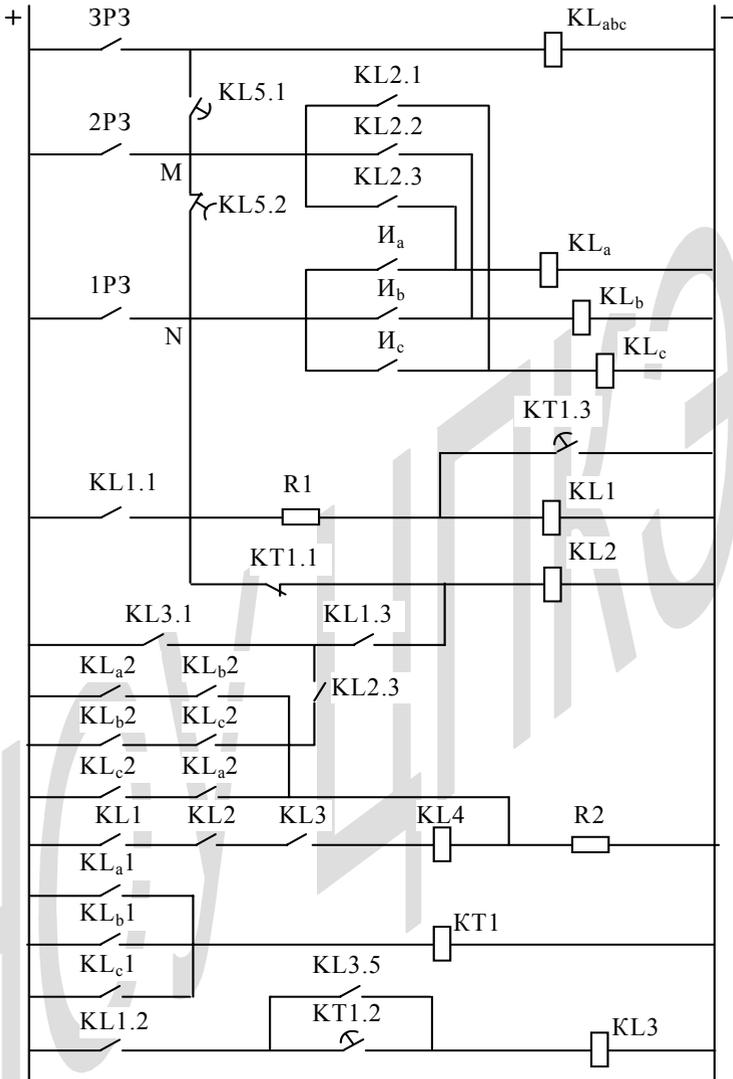


Рис.2.8. Схема ОАПВ линии с двусторонним питанием

Весь комплект релейной защиты линии разделен на три части. Те защиты, которые реагируют на несимметрию токов и напряжений подключают к точке N. На схеме эта группа защит условно обозначена 1РЗ. Защиты, не реагирующие на несимметрию режима, подключаются к точке М и обозначены 2РЗ. Резервные защиты 3РЗ, имеющие выдержки времени больше времени цикла ОАПВ, действуют прямо на выходное реле $KL_{авс}$, отключающее три фазы линии.

Проследим действие автоматики в соответствии с вышеизложенной программой.

Успешное ОАПВ. Предположим, что произошло однофазное короткое замыкание, которое самоликвидируется при отключении поврежденной фазы. В этом случае сработает релейная защита 1РЗ и 2РЗ. Поскольку контакт $KL5.2$ нормально замкнут, то как защита 1РЗ, так и защита 2РЗ подадут питание на контакты избирателей поврежденной фазы I_a , I_b и I_c , и на промежуточное реле $KL1$. Это реле самоудерживается контактом $KL1.1$. Срабатывание избирателя поврежденной фазы и замыкание его контакта (например, I_a) обеспечивает включение реле KL_a , которое в свою очередь отключает поврежденную фазу.

Схема повторного включения приходит в действие от факта отключения поврежденной фазы. Так, если сработало реле KL_a (KL_b , KL_c), через контакты KL_{a1} , KL_{b1} и KL_{c1} подается питание на реле времени $KT1$, которое имеет три выдержки времени $KT1.1$, $KT1.2$ и $KT1.3$. Это реле устанавливает временную программу повторного включения. Так, с выдержкой времени $KT1.2$ подается питание на реле $KL3$, которое в свою очередь через контакты $KL3.1$ подает питание на реле $KL2$. При срабатывании трех реле $KL1$, $KL2$ и $KL3$ подается напряжение на реле $KL4$, которое включает поврежденную фазу.

На этом заканчивается цикл успешного ОАПВ. По истечении выдержки времени $KT1.3$ снимается питание с реле $KL1$ (его обмотка шунтируется контактом $KT1.3$) и схема автоматики возвращается в исходное положение.

Однократность действия ОАПВ обеспечивается тем, что выдержка времени $KT1.2$ реализуется на проскальзывающем контакте, аналогично тому, как это сделано в схеме ТАПВ с пуском от релейной защиты.

Неуспешное ОАПВ. После повторного включения на устойчивое повреждение, релейная защита снова подаст импульс на отключение. В соответствии с программой, теперь следует отключить три фазы. Устройством, запоминающим факт действия автоматики в первом цикле, является реле KL2. Контакты этого реле KL2.1, KL2.2 и KL2.3 шунтируют контакты избирателей поврежденных фаз. При срабатывании одного из избирателей питание сразу через контакты KL2.1, KL2.2 и KL2.3 подается на отключение трех фаз KL_a , KL_b и KL_c .

Напомним, что цикл повторного включения осуществляется с выдержкой времени $KT1.2$, а возврат схемы автоматики повторного включения происходит с выдержкой времени $KT1.3$. Поскольку выдержка времени $KT1.3$ на несколько секунд больше выдержки времени $KT1.2$, то в случае неуспешного ОАПВ вторичное отключение линии происходит до завершения выдержки времени $KT1.3$, т.е. до того как автоматика повторного включения вернется в исходное положение. За счет этого вторичное отключение линии происходит сразу же, как только сработает избиратель поврежденной фазы, так как плюс в точку N уже подан посредством контакта KL1.1. Таким образом, отключение производится даже без действия релейной защиты 1РЗ и 2РЗ.

Междуфазные повреждения. В случае трехфазного повреждения срабатывают избиратели I_a , I_b и I_c и линия отключается тремя фазами. Автоматика повторного включения приходит в действие в той же последовательности, как и при успешном цикле ОАПВ. Но конечный сигнал на повторное включение – подача плюса на реле KL4 блокируется. Эта блокировка выполнена с помощью сочетания контактных пар $KL_{a2} - KL_{b2}$, $KL_{b2} - KL_{c2}$, $KL_{c2} - KL_{a2}$. Если отключалось не менее двух фаз, то, по крайней мере, одна из контактных пар, например, $KL_{a2} - KL_{b2}$ замкнута и плюс подается на второй зажим реле KL4, благодаря чему оно блокируется.

В случае двухфазного повреждения эти же контактные пары, кроме рассмотренного «запрета» повторного включения, подают питание через контакт KL1.3 на реле KL2. Как было рассмотрено выше, это реле подготавливает схему для трехфазного отключения независимо от числа сработавших избирателей поврежденных фаз. Таким образом, и при двухфазном повреждении производится отключение трех фаз линии.

В схеме ОАПВ имеется ряд блокировок и дополнений, повышающих ее надежность и обеспечивающих правильность действия схемы в различных ситуациях. Рассмотрим одну из таких блокировок. С небольшой выдержкой времени после начала действия схемы, срабатывает реле KL5 (обмотка этого реле на схеме не показана). Через контакты реле KL5.1 действие релейной защиты 2РЗ переводится на трехфазное отключение.

Поскольку защита 2РЗ не реагирует на несимметрию токов и напряжений, то ее срабатывание в неполнофазном режиме свидетельствует о повреждении еще одной фазы. В такой ситуации следует подавать сигнал не на отключение одной фазы, а на отключение всех фаз, что и осуществляется посредством реле KL5.

Ряд других блокировок и дополнений на схеме не показаны и здесь не рассматриваются.

2.16. АПВ сборных шин

Короткие замыкания на сборных шинах могут быть проходящими. Если с шин снять, а затем снова подать напряжение, то проходящее короткое замыкание самоликвидируется и может быть восстановлена нормальная работа. С учетом этого, на сборных шинах уместно применять АПВ.

Автоматическое повторное включение шин принципиально не отличается от АПВ линий, поэтому для этой цели используются те же принципы и аппаратура. Некоторая специфика этого вопроса рассматривается ниже.

Различают два подхода в создании АПВ шин. По первому варианту подстанцию включают в зону действия АПВ питающей линии. Такой вариант рассматривается на рис. 2.9.

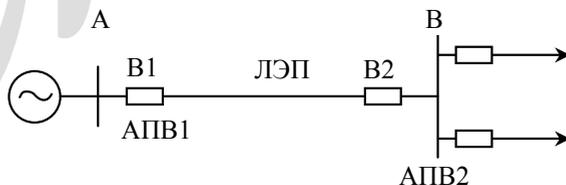


Рис.2.9. К пояснению АПВ сборных шин

Здесь питание подстанции В осуществляется по ЛЭП, на которой установлено АПВ1. В зону действия этого АПВ1 включают и сборные шины подстанции В. Независимо от места повреждения – на самой линии или на сборных шинах подстанции В – релейная защита отключает ЛЭП и она повторно включается действием АПВ1. Отключение и включение производится выключателем В1.

По второму варианту подстанция имеет собственную автоматику повторного включения с действием на выключатель В2, приемного конца питающей линии. Отключение выключателя В2 производится дифференциальной защитой шин подстанции В. Повторное включение этого выключателя осуществляется действием АПВ2.

Каждый из рассмотренных вариантов имеет свои достоинства и недостатки и, соответственно, определенную область применения. Первый вариант выгоднее с точки зрения количества аппаратуры. По этому варианту не надо устанавливать АПВ2 и собственную защиту сборных шин. Этот способ широко применяется на тупиковых подстанциях с одной питающей линией.

Второй вариант предпочтительнее для подстанции с несколькими питающими линиями. В этом случае дифференциальная защита шин отключает выключатели всех питающих линий, а автоматика повторного включения действует или на один или последовательно на несколько выключателей, тем самым повторно включает одну или несколько питающих линий.

Если в послеаварийном режиме для обеспечения потребителей подстанции достаточно включить всего одну линию, то используется АПВ только одной линии. Если для питания потребителей одной питающей линии недостаточно, то АПВ2 действует на несколько или на все линии. В этом варианте необходимо соблюдать очередность включения линий. Сначала включается одна линия, что создает подстраховку на случай неуспешного АПВ при устойчивом коротком замыкании. В такой ситуации повторно включенная линия еще раз отключается, а действие АПВ на другие линии блокируется, устраняя тем самым их включение на устойчивое короткое замыкание.

Если АПВ успешное, то продолжается автоматическое включение последующих линий. Эта очередность продиктована невозможностью одно-

временного включения нескольких выключателей из-за ограниченной мощности аккумуляторной батареи.

В варианте с несколькими питающими линиями необходимо учитывать изменение условий для действия дифференциальной защиты шин. Когда включены все питающие линии, то ток короткого замыкания при повреждении на сборных шинах вполне достаточен для действия дифференциальной защиты. Если повреждение устойчивое и происходит повторное включение, а такое включение производится на одной линии, то ток короткого замыкания может быть значительно меньше чувствительности дифференциальной защиты. В такой ситуации необходимо либо автоматически менять уставку дифференциальной защиты в связи с действием АПВ, либо иметь вторую, более чувствительную защиту, вводимую в работу в цикле АПВ.

В случае нескольких питающих линий от разных источников, при повторном включении сборных шин необходимо следить за синхронностью встречных напряжений. Здесь возможны те же варианты, что и при АПВ линии с двусторонним питанием. Может оказаться, что между источниками питания имеются другие линии, которые обеспечивают синхронность работы этих источников при отключении рассматриваемой подстанции. В этом случае может применяться наиболее простое АПВ шин без проверки синхронности напряжений. Если отключение питающих подстанцию линий может привести к выходу из синхронизма отдельных станций энергосистемы, то АПВ шин должно дополнительно иметь устройства контроля синхронности встречных напряжений, т.е. по сути дела на подстанции должен применяться комплект АПВОС. При должном обосновании может быть использовано НАПВ.